

1.Шутенко Л.Н., Золотов М.С., Гарбуз А.О., Ткаченко Р.Б. Усиление сцепления арматуры с бетоном // Материалы II междунар. науч.-техн. интернет-конференции «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства». – Харьков: ХНАГХ, 2007. – С.127-130.

2.Шутенко Л.Н., Макогон Д.А., Ткаченко Р.Б. Влияние некоторых технологических факторов на прочность и деформативность клеевой анкеровки арматурных стержней // Материалы к 46-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов – МОК'46. – Одесса: ОГАСА, 2007. – С.209-210.

3.Шутенко Л.Н., Золотов М.С., Ткаченко Р.Б. Зависимость глубины заделки арматурных стержней класса А500С от прочности акрилового клея // Коммунальное хозяйство городов.: Науч.-техн. сб. Вып.79. – К.: Техніка, 2007. – С.36-45.

4.Фам Минь Ха. Длительная прочность и напряженно-деформированное состояние анкеровки арматурных стержней периодического профиля акриловыми клеями: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 2000. – 162 с.

5.Рекомендации по применению арматурного проката по ДСТУ3760-98 при проектировании и изготовлении железобетонных конструкций без предварительного напряжения арматуры. – К.: Госстрой Украины, 2002. – 40 с.

Получено 11.04.2008

УДК 624.072.2.012.45.042.5

В.И.КОРСУН, д-р техн. наук, Е.А.ДМИТРЕНКО

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г.Макеевка

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния скорости нагружения на прочность и деформации тяжелого бетона в условиях воздействия повышенных до +200°C температур. Предложено модифицированное выражение для функции учета режима нагружения в методике диаграмм-изохрон.

Конструкции большинства зданий и инженерных сооружений подвержены сложным режимам силовых и температурно-влажностных воздействий. Точность оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций в определяющей степени зависит от достоверности используемых физических соотношений и полноты учета в них основных значимых факторов.

Известные методики расчета таких конструкций [6, 7] построены на основе раздельного учета физической нелинейности и неравновесности деформирования бетона и обладают определенной условностью, так как предполагают последовательное решение задач двух типов: реологической задачи по определению НДС конструкций при длительном действии температуры и нагрузок эксплуатационного уровня и задачи определения НДС на последующее кратковременное догру-

жение элементов конструкций расчетными нагрузками до разрушения методами нелинейной теории деформирования железобетона с трещинами [2]. Задача первого типа решается на основе теории старения с использованием допущения о наложении приращений деформаций ползучести. Решение такой задачи возможно только для простых элементов конструкций и весьма затруднительно для более сложных конструкций, так как требует значительных ресурсов ПЭВМ из-за необходимости хранения в памяти больших массивов информации об истории силовых и температурных нагружений. При решении задачи второго типа скорость и продолжительность нагружения возрастающей нагрузкой, как правило, не учитываются и принимаются соответствующими кратковременному статическому нагружению. Отмеченные недостатки методик [6, 7] могут быть преодолены путем применения физических соотношений в виде диаграмм-изохрон [3].

Влияние скорости нагружения на характеристики механических свойств бетона к настоящему времени исследовано недостаточно, особенно в условиях воздействия повышенных температур. Результаты исследований [1, 2, 5, 8, 9] свидетельствуют о том, что со снижением скорости нагружения осевым сжатием в 12-72 раза по сравнению со стандартной при кратковременных испытаниях в условиях нормальной температуры, прочность снижается на 7-12%, предельная сжимаемость увеличивается на 5-42%.

Рассматриваемые в данном исследовании режимы нагружений – жесткий с условно мгновенным приложением нагрузки до уровня $\eta = \sigma/R_b$ и последующей выдержкой в течение времени T_σ и мягкие (рис.1) со ступенчатым пропорциональным нагружением возрастающей нагрузкой и значениями продолжительности выдержки на каждой ступени: 5 мин. (режим №0 – эталонный); 2 ч (режим №2); 36 ч (режим №3); 72 ч (режим №4). Общая продолжительность нагружения образцов до разрушения для режимов 0, 2-4 составила 1 ч, 1 сут., 15 сут. и 30 сут. соответственно, величина ступени составляла 0,1 от ожидаемой расчетной предельной нагрузки (рис.2). При анализе результатов принимали во внимание также данные [5, 8], полученные при ступенчато возрастающем нагружении в течение 12 ч с 60-минутной выдержкой на каждой ступени и средней скоростью нагружения 2,5 МПа/ч (режим №1).

Опытные образцы-призмы с размерами 150×150×600 мм. Бетон состава Ц:П:Щ = 1:2,5:1,4 с В/Ц=0,4, соответствующий классу бетона по прочности на сжатие В-40. Измерение продольных деформаций образцов осуществляли с помощью индикаторов часового типа ИЧ-10 на базе 400 мм, поперечных – индикаторами МИГ-2 на базе 150 мм.

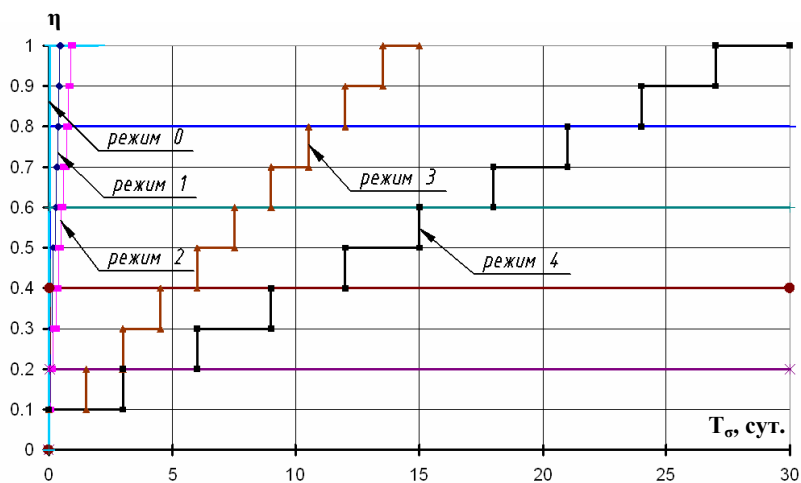


Рис.1 – Траектории мягких режимов нагружения

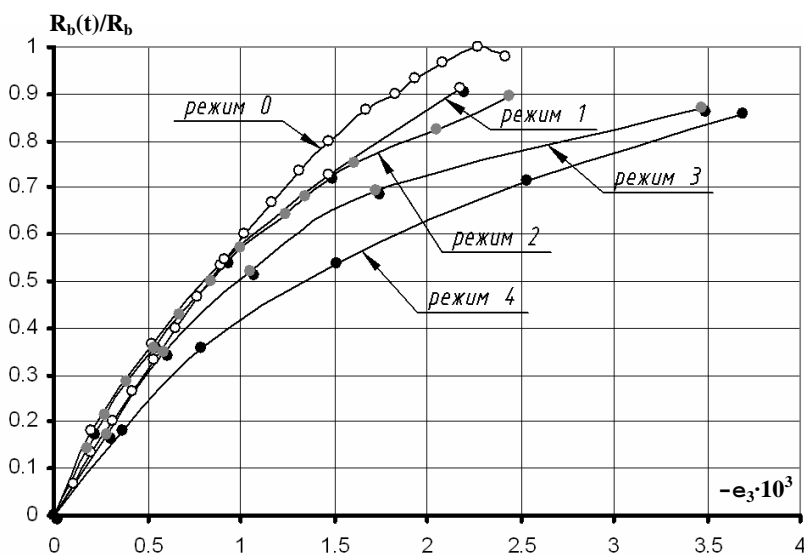


Рис.2 – Влияние продолжительности нагружения на диаграмму деформирования бетона в условиях нормальной температуры

Нагрев образцов проводили до начала нагружения. Продолжительность первого кратковременного нагрева перед силовыми испытаниями составляла 16, 14 и 12 ч для температур нагрева 90, 150 и 200 °С соответственно, что отвечает времени достижения бетоном минимальной прочности. Нагружение образцов осевой сжимающей силой выполняли на специальных установках с помощью гидравлических домкратов ДГ-200. Во избежание потерь давления на этапах длительной выдержки в гидросистему нагружения были включены баллоны-ресиверы со сжатым воздухом.

Для определения влияния температурного старения на деформации бетона часть образцов была испытана нагружением по стандартной методике (режим №0) после продолжительного нагрева при температурах +90, +150 и +200 °С такой длительности, чтобы общая продолжительность нагрева образцов к моменту разрушения по различным режимам силового нагружения совпадала.

При стандартной скорости нагружения (режим №0) прочность бетонных образцов-призм в условиях кратковременного нагрева при температурах 90 и 150 °С снизилась на 29 и 25% соответственно по сравнению с испытаниями при нормальной температуре. При этом начальный модуль упругости снизился в среднем на 35%, а предельная сжимаемость увеличилась на 48 и 25% соответственно. Длительный нагрев бетона в течение 100 и 45 суток при температурах 90 и 150 °С привёл, в сравнении с кратковременным нагревом, к некоторому приросту прочности бетона на 9 и 6%, предельной сжимаемости на 14,2 и на 25% соответственно [4, 7]. При снижении скорости нагружения в 12 раз (режим №1) прочность бетона, по данным [4, 7], при температурах нагрева 90 и 150 °С снизилась соответственно на 29 и 19%, начальный модуль упругости – на 28 и 34%, предельная сжимаемость увеличилась на 7 и 22%. При увеличении продолжительности нагружения до 15 сут. (режим №3) наблюдалось максимальное снижение прочности на 13, 29, 25 и 24% при температурах испытаний 20, 90, 150 и 200 °С соответственно. При увеличении продолжительности нагружения до 30 суток (режим №4), наблюдался некоторый прирост прочности бетона в сравнении с более быстрыми режимами нагружения, и чем выше температура нагрева, тем более существенным был прирост прочности (рис.3- 5).

Влияние на прочность бетона скорости нагружения в условиях нормальной температуры было исследовано авторами работ [1, 2, 5, 8, 9]. С использованием аналитического выражения, предложенного в [1], а также на основании статистической обработки проведенных опытов с привлечением данных указанных выше работ было получено

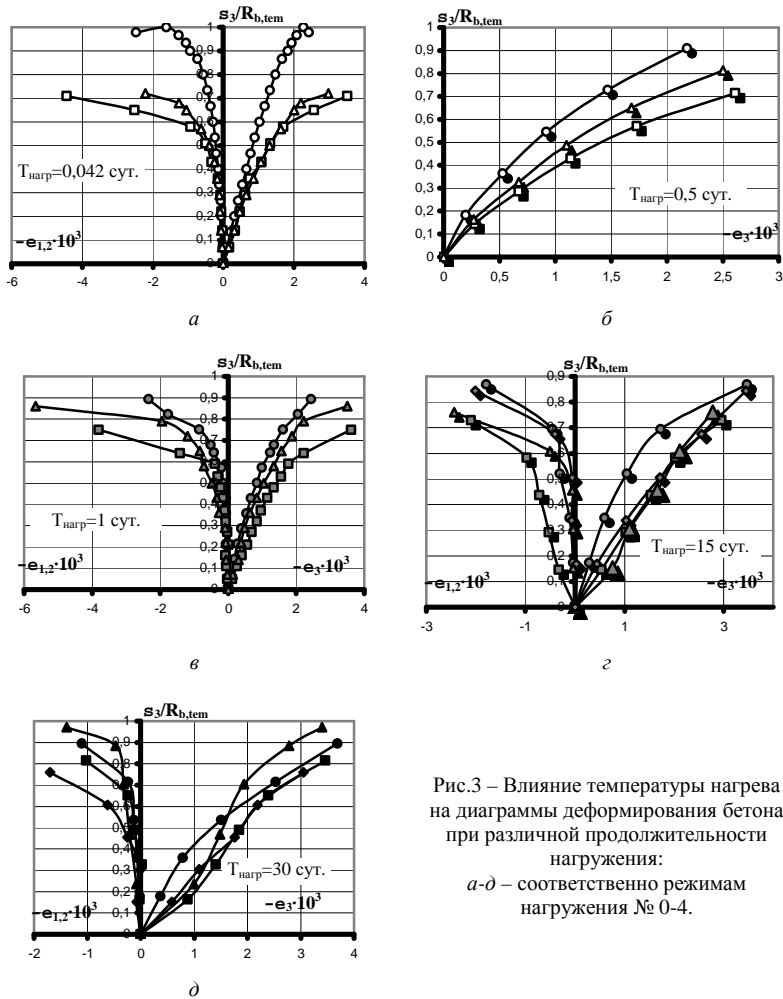


Рис.3 – Влияние температуры нагрева на диаграммы деформирования бетона при различной продолжительности нагружения:
а-д – соответственно режимам нагружения № 0-4.

Условные обозначения:

Продолжительность нагружения, сут.	Температура нагрева, °С			
	20	90	150	200
0,042 (режим №0)	○	◻	△	◇
0,5 (режим №1)	◐	◑	◒	◅
1 (режим №2)	●	■	▲	◆
15 (режим №3)	●	■	▲	◆
30 (режим №4)	●	■	▲	◆

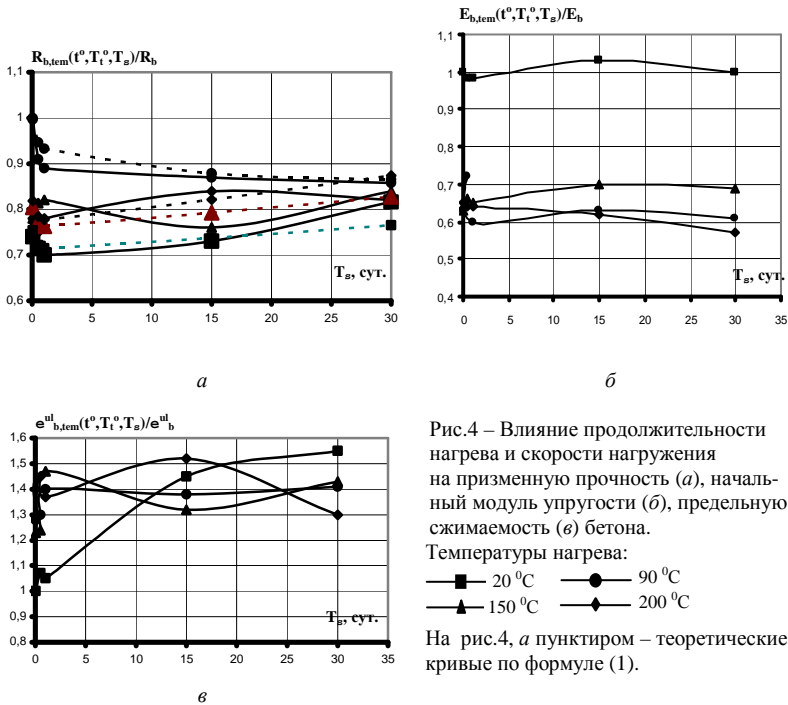


Рис.4 – Влияние продолжительности нагрева и скорости нагружения на призменную прочность (а), начальный модуль упругости (б), предельную сжимаемость (в) бетона.

Температуры нагрева:

—■— 20 °C —●— 90 °C
—▲— 150 °C —◆— 200 °C

На рис.4, а пунктиром – теоретические кривые по формуле (1).

аналитическое выражение, удовлетворительно описывающее влияние продолжительности нагружения на прочность бетона в условиях нагрева до +200 °C (рис.4, а):

$$\frac{R_1}{R_2} = 0,933 - 0,02 \ln(T_\sigma) + A(t^o), \quad (1)$$

где $A(t^o) = 0,075(t^o - 20)^{C_1 \cdot t}$; $C_1 = -8,2 \cdot 10^{-8} \cdot (t^o)^2 + 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot t^o - 8,11 \cdot 10^{-4}$; T_σ – продолжительность нагружения, сут.; t^o – температура нагрева, °C; R_1 – эталонная прочность, за которую принята прочность бетонных образцов-призм, испытанных со скоростью $V_1 = 0,5$ МПа/мин. (режим 0).

Методика теоретического построения диаграмм-изохрон для бетона в условиях повышенных температур базируется на методике [2, 3], разработанной Н.И.Карпенко и Т.А.Мухамедиевым для условий нормальной температуры и развитой в работе для условий повышенных температур. Учёт влияния нагрева на характеристики прочност-

ных и деформативных свойств бетона учитывается на основе модифицированных выражений [4].

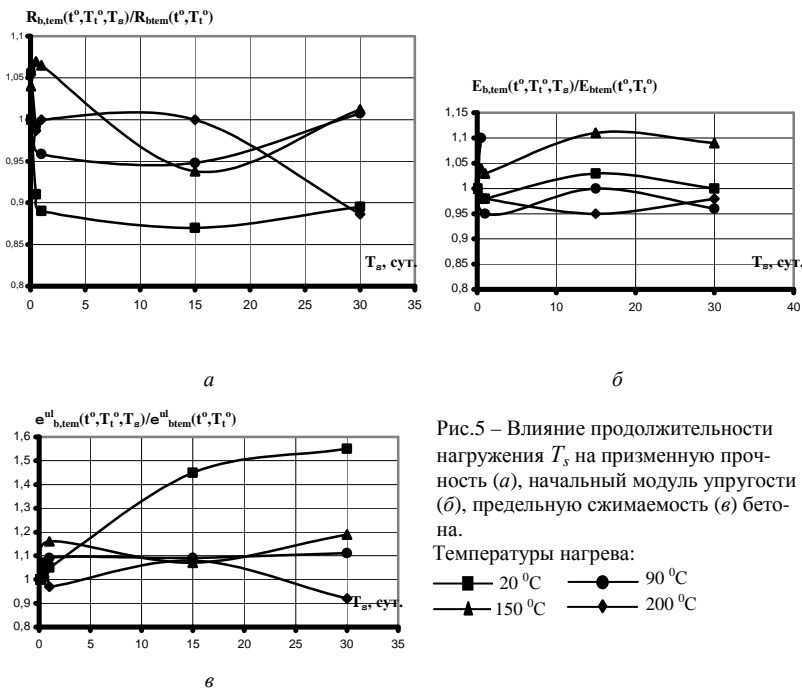


Рис.5 – Влияние продолжительности нагружения T_s на призменную прочность (а), начальный модуль упругости (б), предельную сжимаемость (в) бетона.

Температуры нагрева:

—■— 20 °C —●— 90 °C
—▲— 150 °C —◆— 200 °C

Зависимость между напряжениями и деформациями в методике изохрон при нагреве согласно [2, 7] принимается в виде:

$$\varepsilon_b(t^0, T_{red}, \tau_{red}) = \frac{\sigma_b(T)}{R_{b,tem} \cdot \nu_b(t^0, T_{red}, \tau_{red})}, \quad (2)$$

где $\sigma_b(T)$ – напряжение в бетоне в рассматриваемый момент времени T ; T_p – время действия температуры, сут.; $R_{b,tem}$ – прочность бетона на осевое сжатие при воздействии температуры; T_{red} – приведенное время, сут.; ν_b – коэффициент упругости деформации бетона; τ_p – возраст бетона к моменту начала нагрева, сут.; τ_σ – возраст бетона к моменту начала нагружения, сут.; τ_{red} – приведенное время действия температуры до начала нагружения, сут.

Коэффициент изменения модуля деформации бетона $\nu_b(t^0, t_{red}, \tau_{red})$, определяемый из выражения [2]

$$\nu_b(t^0, T_{red}, \tau_{red}) = \hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red}) \pm [(\nu_o(t^0, T_{red}, \tau_{red}) - \hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red})) + \sqrt{1 - \omega_1 \cdot \eta - \omega_2 \cdot \eta^2}], \quad (3)$$

где

$$\eta = \frac{\sigma_b(T)}{R_{b,tem}}, \quad \omega_2 = 1 - \omega_1; \quad (4)$$

$\sigma_b(T)$ – величина напряжения в бетоне, которая в вершине диаграммы деформирования для случая сжатия принимается равной $\sigma_b(T) = R_{b,tem}$.

Коэффициентом $\nu_b(t^0, T_{red}, \tau_{red})$ изменения секущего модуля деформаций учитывается влияние нелинейности деформирования бетона при кратковременном (условно мгновенном) нагружении и ползучести бетона, включая ее нелинейную составляющую, на диаграмму деформирования бетона. В формуле (3) $\nu_o(t^0, T_{red}, \tau_{red})$ и $\hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red})$ являются соответствующими значениями коэффициента в начале и в вершине диаграммы.

Коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы для случая $(T_{red} - \tau_{red}) \rightarrow \infty$ определяется по формуле [2, 3]

$$\nu_b[(t^0, T_{red} - \tau_{red}) \rightarrow \infty] = \frac{\hat{\nu}_b(t^0, T_{red})}{1 + \hat{\nu}_b(t^0, T_{red}) \cdot k_r \cdot f_c(t^0, T_{red}) \cdot \varphi(t^0, T_{red}, \tau_{red})}, \quad (5)$$

где $\hat{\nu}_b(t^0, T_{red})$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы деформирования бетона при кратковременном нагружении (без учета ползучести бетона); $f_c(t^0, T_{red})$, $\varphi(t^0, T_{red}, \tau_{red})$ – соответственно функция нелинейности и характеристика ползучести бетона в условиях нагрева.

Начальный коэффициент изменения секущего модуля определяется по формулам [2,3]:

для восходящей ветви диаграммы ($|\epsilon_b| \leq |\epsilon_{u,tem}|$):

$$\nu_o(t^0, T_{red}, \tau_{red}) = \frac{1}{1 + k_r \cdot \varphi(t^0, T_{red}, \tau_{red})}; \quad \omega_1 = 2 - 2,5 \cdot \hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red}); \quad (6)$$

для нисходящей ветви диаграммы ($|\epsilon_b| > |\epsilon_{u,tem}|$):

$$\nu_o(t^0, T_{red}, \tau_{red}) = 2,05 \cdot \hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red});$$

$$\omega_1 = 1,95 \frac{\hat{\nu}_b(t^0, T_{red}, \tau_{red})}{\nu_o(t^0, T_{red}, \tau_{red})} - 0,138. \quad (7)$$

Деформации ползучести бетона описываются двумя параметрами – характеристикой ползучести $\varphi(T, \tau)$ и линейной мерой ползучести бетона $C(T, \tau)$, связь между которыми с учетом температуры и продолжительности нагрева имеет вид:

$$\varphi(t^{\circ}, T_{red}, \tau_{red}) = C(t^{\circ}, T_{red}, \tau_{red}, T_o) \cdot E_{b,tem} \quad (8)$$

В формулах (5), (6) k_r – это коэффициент, учитывающий режим нагружения – жесткий или мягкий. Для жесткого режима $k_r=1$, для мягкого – по формулам (11)-(12).

В методике [6] расчетного определения деформаций ползучести тяжелого бетона в условиях нагрева линейная мера ползучести в общем случае складывается из меры ползучести при нормальной температуре $C(t^{\circ}, T_o)$ и меры ползучести при последующем нагреве:

$$C(t^{\circ}, T_{red}, \tau_{red}, T_o) = C(t^{\circ}, T_o) + C(t^{\circ}, T_{red}, \tau_{red}), \quad (9)$$

где $C(t^{\circ}, T_o)$ определяется по формулам [6] и в случае отсутствия нагрузки при нормальной температуре, принимается равной 0.

Нелинейность деформаций ползучести бетона в условиях нагрева учитывается функцией в форме [2]:

$$f_c(t^{\circ}, T_{red} \rightarrow \infty) = I + (v_c \cdot k + k_t) / D(T, t^{\circ}). \quad (10)$$

Разработано предложение по коррекции коэффициента k_r , учитывающего в методике [7] диаграмм-изохрон влияние режима силового нагружения при воздействии повышенных температур:

$$k_r = A_t (t_{red})^{B_t} + C_t, \quad (11)$$

где

$$A_t = 4,116e^{-0,024 \cdot t^{\circ}} + 0,249; B_t = -1,952 \cdot 10^{-5} \cdot t^{\circ 2} + 8,07 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ} - 0,852;$$

$$C_t = 1,311e^{-0,027 \cdot t^{\circ}} + 0,249. \quad (12)$$

Расчетные диаграммы-изохроны по формулам (2)-(12) для случаев нагружения различной продолжительности при температуре 20 °С представлены на рис.6.

Таким образом, основными факторами, определяющими характер диаграмм-изохрон для бетона в условиях нагрева, являются температурное старение и нелинейность деформаций ползучести бетона. Аналитическое выражение (1) позволяет удовлетворительно оценивать прочность бетона в зависимости от продолжительности нагружения, температуры и продолжительности нагрева. Была уточнена методика диаграмм-изохрон при учете режимов мягкого нагружения в условиях воздействия повышенных температур различной длительности.

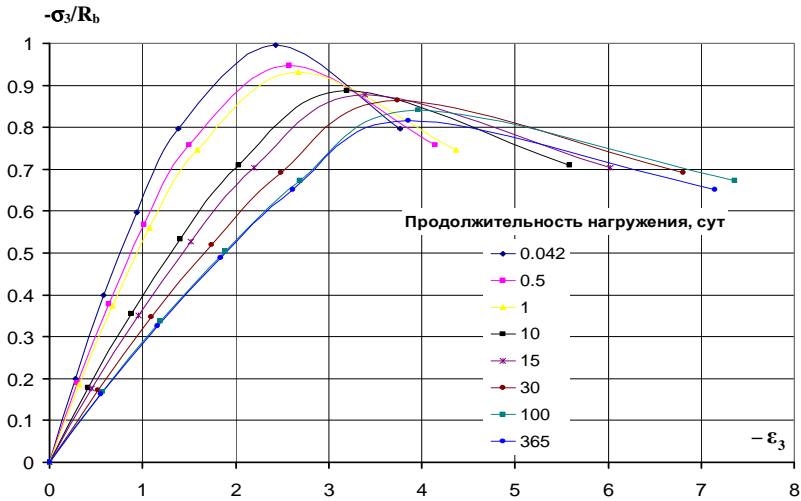


Рис.6 – Расчетные диаграммы-изохроны для бетона в условиях нормальной температуры

1.Гвоздев А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. – М.: Стройиздат, 1978. – 242 с.

2.Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

3.Карпенко Н.И., Прокопович И.Е., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н., Яременко А.Ф. Учет деформаций ползучести и длительного сопротивления бетона в методике диаграмм-изохрон // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1987. – С.66-81.

4.Корсун В.И. К определению основных характеристик прочностных и деформационных свойств бетона для условий воздействия повышенных температур // Композиционные материалы для строительства: Вестник ДГАСА. – Макеевка, 1999. – С.181-184.

5.Корсун В.И., Мессауди А. К определению основных параметров диаграмм деформирования бетона в условиях воздействия повышенных температур // Экологические проблемы промышленного региона. Т.3: Ресурсосберегающие технологии в проектировании конструкций и технологических процессов. – Макеевка, 1995. – С.97-98.

6.Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.

7.Кричевский А.П., Корсун В.И., Баев А.М. Расчет инженерных сооружений на температурные воздействия с использованием изохрон // Проектирование и строительство инженерных сооружений из монолитного железобетона. – Л., 1989. – С.73-86.

8.Мессауди А. Влияние нагрева и скорости нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.18. – К.: Техніка, 1999. – С 250-256.

9.Стрелков Г.П., Смолянинов Ю.М. Поперечные и объемные деформации бетона, их связь с длительной прочностью // Бетон и железобетон. – 1972. – №4. – С.100-110.

Получено 17.04.2008